

内蒙古典型草原生态安全评估及影响因子分析

田美荣^{1,2}, 李晓兵¹, 李旭¹

(1. 北京师范大学 资源学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:内蒙古典型草原区处于全球变化的敏感区域,是我国重要的生态屏障区,由于地下蕴藏着丰富的矿产资源,被列为我国重要能源战略基地。为探讨内蒙古典型草原区经济社会发展对生态安全的影响,研究以阿巴嘎旗为例,在生态足迹理论的基础上,引入生态安全压力指数来判断生态安全状态,并运用主成分分析法评判影响因子的影响大小。结果表明:2001—2010 年阿巴嘎生态足迹增长明显,生态承载力变化较小,因此,生态安全压力指数增长趋势明显,增长了近 3.5 倍,到 2010 年为生态不安全状态。主要影响因子人均 GDP、人均化石能源消耗、工业产值占国内生产总值的比重、单位面积固定资产投资、城市化率与生态安全压力指数呈正相关,万人在校生数、草场载畜量和降雨量与生态安全压力指数呈负相关关系。研究结果可为典型草原区环境管理提供支撑。

关键词:典型草原;生态足迹;生态安全;主成分分析

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0169-05

Ecological Security Assessment and Analysis on Influencing Factors in Typical Steppe of Inner Mongolia

TIAN Mei-rong^{1,2}, LI Xiao-bing¹, LI Xu¹

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China)

Abstract: The typical steppe of Inner Mongolia, which lies within sensitive area of the global change, is the important ecological barrier against sandstorms in China, and is one of the important energy strategies in China for the abundant mineral resources. In order to discuss the influence on the ecological security induced by economic and social development, this paper took Abag County as the research example. The pressure index of the ecological security was introduced on the basis of ecological footprint methodology, aiming at assessing the state of ecological security as well as the magnitude of each influencing factor by the principal component analysis (PCA). The results showed that the pressure index of ecological security had grown up nearly 3.5 times higher with the obvious increase of ecological footprint and small change of biocapacity from 2001 to 2010; which led to a state of unsafe in terms of ecological security in Abag County in 2010. The principle influencing factors such as the per capita GDP, the per capita fossil energy consumption, the proportion industrial output value taking up total output value of production, fixed asset investment and urbanization rate are positively correlated to pressure index of ecological safety, meanwhile, the number students of ten thousand and pasture grazing capacity and precipitation showed a negative correlation. The results could be beneficial for providing the local government the references on typical steppe ecological management.

Key words: typical steppe; ecological footprint; ecological security; principal component analysis

内蒙古曾以丰茂的草原闻名于世界,但随着社会经济的快速发展,内蒙古温带草原区承受着生态系统

过度开发利用和巨大的人口压力,使生态系统和生态系统服务功能严重退化,生态系统呈现出由结构性破

坏向功能性紊乱的方向发展,由此引起的水资源短缺、水土流失、沙漠化、生物多样性减少等生态问题持续加剧,对我国生态安全造成严重威胁^[1],同时由于该区域是全球变化的敏感地区^[2],因此内蒙古典型草原区的生态安全问题成为国内外有关专家关注研究的热点。国内对生态安全的研究是从 20 世纪 90 年代开始的,90 年代后期才逐渐为人们所重视。

生态安全评价属于一种综合评价,其主要的 evaluation 方法有压力—状态—响应模型法(PSR 法)^[3]、系统聚类法、生态足迹法^[4-5]、综合指标法等。其中,生态足迹法是生态安全定量评估中概念与原理最简单、明确的方法,容易理解,可进行长期生态风险和区域间对比性研究^[6-8]。因此本文采用生态足迹法对内蒙古典型草原区生态安全进行评估,同时采用主成分分析法判别影响生态安全的主要因子,以期对典型草原环境管理和可持续发展提供支撑。

1 研究区概况

内蒙古锡林郭勒盟典型草原区位于中国内蒙古自治区的阿巴嘎旗、锡林浩特市、东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗境内;其中阿巴嘎旗位于内蒙古自治区锡林郭勒盟典型草原区的西南部,全旗总面积 2.75 万 km²,属于大陆性干旱、半干旱气候;年均气温 -1~4℃,年均降水总量 150~260 mm 是一个以高平原为主体、兼有多种地貌的地理单元,海拔 800~1 800 m,地势南高北低,东高西低;本区土壤类型主要有栗钙土、黑钙土、棕钙土、潮土、风沙土、沼泽土及盐碱土;草原类型主要为温带丛生禾草典型草原,温带禾草、杂类草草甸草原及部分温带禾草、杂类草盐生草甸;植被组成主要以大针茅(*Stipa grandis* P. Smirn.)、克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev.)、羊草(*Leymus chinensis* Trin. Tzvel.)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* Keng)等旱生型禾草占优势。

2 研究方法 with 数据

2.1 研究方法

2.1.1 生态足迹评估方法 生态足迹主要是用来计算一定人口所消费的所有资源和消纳这些人口所产生的所有废弃物所需要的生物生产性土地面积,目前生态足迹主要分为 6 大土地占用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和吸收碳排放土地(碳足迹)。生态足迹单位为全球公顷(global hectare)缩写为 ghm²,其评估模型为:

$$EF = \frac{Q}{Y_n} \cdot Y \cdot r = \frac{Q}{Y_n} \cdot \frac{Y_n}{Y_w} \cdot r = \frac{Q}{Y_w} \cdot r \quad (1)$$

式中:EF——生态足迹;Q——生物性产品产量或 CO₂ 排放量;Y_n——国家平均产量(或者吸收二氧化碳排放能力);Y——产量因子;r——平衡因子;Y_w——产品的世界平均生产产量。

吸收碳排放土地主要是用来消纳二氧化碳废气排放,因为地球上吸收二氧化碳排放主要是森林,因此吸收碳排放土地在碳足迹理论中指的主要是林地^[9],计算公式如下:

$$EF_{\text{carbon uptake land}} = \frac{P_c(1 - S_{\text{ocean}})}{Y_c} \cdot r \quad (2)$$

式中:P_c——每年二氧化碳人为排放量;S_{ocean}——被海洋吸收碳排放的比例。据 IPCC 报告每年大约 1/3 的碳排放量被海洋吸收^[10];Y_c——世界平均每公顷林地吸收二氧化碳量;r——均衡因子。

2.1.2 生态承载力评估方法 生态承载力是指区域实际供给的生物生产性土地面积,其计算方法是:将区域各种生物生产性面积乘以均衡因子和产量因子后,再求和所得到的总的生态承载力。其评估模型为:

$$BC = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_i \cdot Y_i \quad (3)$$

式中:BC——区域总的生态承载力;i——生物生产性土地类型;a_i——第 i 种土地利用类型生物生产面积;r_i——均衡因子;Y_i——产量因子。在生态承载力的计算中,考虑到同一生产面积的土地可能有多种用途,根据世界环境与发展委员会(WCED)的报告,在计算典型草原区生态承载力时扣除 12% 的生物多样性保护面积。

2.1.3 生态安全评估方法 某一国家或地区的生态足迹与生态承载力的比率作为生态压力指数,该指数代表了区域生态环境的承压程度,通常利用生态压力指数表示生态安全程度,来进行区域生态安全分析与评判。其评估模型为:

$$T = EF/BC \quad (4)$$

式中:T——区域生态安全压力指数;EF——区域总生态足迹;BC——区域总生态承载力。该指数越大,说明该区域生态压力越大,区域生态安全性越差。据国内相关参考文献^[11-12],按照生态压力指数大小对生态安全性等级进行划分,具体的对应关系见表 1。

表 1 基于生态安全压力指数的生态安全指标等级划分

安全等级	安全压力指数	安全状态
I	$T < 0.5$	理想状态
II	$0.5 \leq T \leq 0.8$	安全
III	$0.8 \leq T \leq 1.0$	过度状态
IV	$T > 1.0$	不安全

2.1.4 主成分分析法

(1) 构建矩阵。主成分分析法应用在土地利用

变化影响因素分析中的模型原理为:首先,以年份时间序列收集各种指标因素数值,假设这些指标因素都对生态安全产生影响,则有 n 个年份样本 (n =年份数量),每个样本有 m 个变量 (m =指标因素数量, X_1, X_2, \dots, X_m),建立 $n \times m$ 阶的指标数值矩阵 F 。

(2) 标准化处理。其次,将指标数值矩阵 F 中的每一个元素 $F_{ij} (i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, m)$ 进行标准化处理。数值标准化是为了消除不同指标数值之间不同单位、不同数量级的影响,便于指标数值之间的综合分析,标准化之后的指标数值平均值等于 0,标准差等于 1。数据标准化的方法有很多,但目前还没有通用的固定方法,本文选取应用较多的偏差法作为本文的标准化方法^[13],公式为:

$$B_{ij} = \frac{F_{ij} - M_j}{S_j} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中: M_j, S_j ——指标因素矩阵 F 第 j 列向量的平均值和标准差。原始数据标准化之后的新矩阵记为 B ,即 $n \times m$ 阶 $B=(B_{ij})_{n \times m}$ 。

(3) 主成分通过坐标变化手段,将含有 m 个指标因素的 $B_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$ 做线性变化,转化为一组相互无关的综合变量 $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_m$,

Z_1, Z_2, \dots, Z_m 分别称为原始指标变量的第一,第二, ..., 第 m 主成分,其中 Z_1 在总方差中占的比例最大,综合原始指标变量的能力最强,包含的信息量最大,其余主成分在总方差中占的比重依次减少,即 $\text{var}(Z_1) \geq \text{var}(Z_2) \geq \dots \geq \text{var}(Z_m)$ 。

(4) 主成分贡献率及累计贡献率。主成分 Z_i 贡献率公式:

$$Z_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

累计贡献率公式 Z'_i :

$$Z'_i = \sum_{k=1}^i \lambda_k / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

(5) 主成分载荷。主成分载荷矩阵公式:

$$k_{ij} = \sqrt{\lambda_i} e_{ij} \quad (i, j=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

式(6),(7)和(8)中 λ 为特征值, e_{ij} 为特征值所对应的特征向量的元素。

(6) 回归分析。调用 MATLAB 提供的 stepwise() 函数进行逐步多元回归分析。

2.2 数据来源

生态足迹与生态承载力计算数据主要来源于 2001—2011 年《锡林格勒盟统计年鉴》、《阿巴嘎旗统计年鉴》,尽管产量因子和均衡因子是随着区域经济发展和土地利用方式的改变而改变,但这种变化对生态足迹年际变化趋势影响并不大,因此,数据主要来源于参考文献(表 2)^[14-15]。计算吸收碳排放足迹中

P_c 采用了 IPCC 第四次报告数据^[16], Y_c 从相关文献中获得^[17]。

表 2 均衡因子和产量因此参考表

土地类型	耕地	草地	林地	水域	化石能源用地	建设用地
均衡因子	2.8	0.5	1.1	0.2	1.1	2.8
产量因子	1.66	0.19	0.91	1	—	1.66

通过对阿巴嘎旗现状及相关数据调研筛选出影响生态安全的因子包括:人均 GDP、工业产值占国内生产总值的比重、单位面积固定资产投资、城市化率、万人在校生数、草场载畜量、年降雨量和化肥施用强度共 8 个影响因子,相关数据来自 2001—2011 年《阿巴嘎旗统计年鉴》。

3 结果与分析

3.1 生态足迹与生态承载力变化

2001—2010 年阿巴嘎旗生态足迹呈增长趋势,从 $6.6 \times 10^4 \text{ ghm}^2$ 增长到 $2.919 \times 10^5 \text{ ghm}^2$,增长了 4.4 倍。其中碳足迹增长最快从 $1.24 \times 10^4 \text{ ghm}^2$ 到 $2.318 \times 10^5 \text{ ghm}^2$,增长了近 18.8 倍,主要是从 2004 年开始,碳足迹增长速度不断加快。2001—2010 年期间,耕地、草地、林地、水域和建设用地足迹增长较平缓。由于阿巴嘎属于草原区草原面积占区域总面积 92%,其他生物生产性面积比例仅占整个区域的 8%,2001—2010 年草原面积减少 174 km^2 ,占 2001 年的 0.6%,变化甚微,因此 2001—2010 年生态承载力增长平缓从 $2.288 \times 10^5 \text{ ghm}^2$ 增长到 $2.842 \times 10^5 \text{ ghm}^2$ (图 1)。

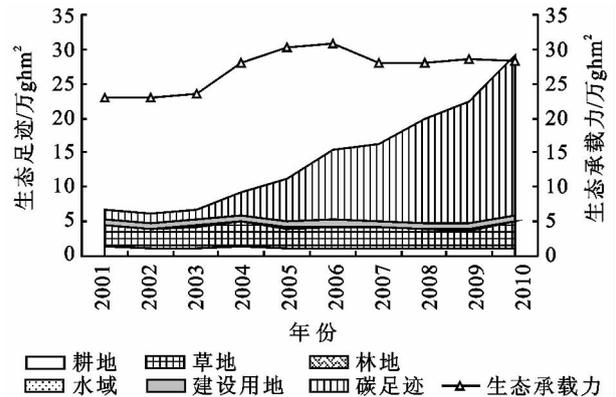


图 1 2001—2010 年生态足迹与生态承载力变化

随着生态足迹的不断增长,人均生态足迹的增加迅速,从 2001 年的 $1.53 \text{ ghm}^2/\text{人}$,增到到 2010 年的 $6.50 \text{ ghm}^2/\text{人}$,人均生态足迹增长反映了随着生活水平的提高,人均消费生物性产品数量增加。由于承载力和人口均增长缓慢,2001—2010 年人均承载力呈现略微增加,但到 2010 年人均足迹超过了人均承

承载力,因此人均足迹的增长势必造成对环境的压力在不断加大(图 2)。

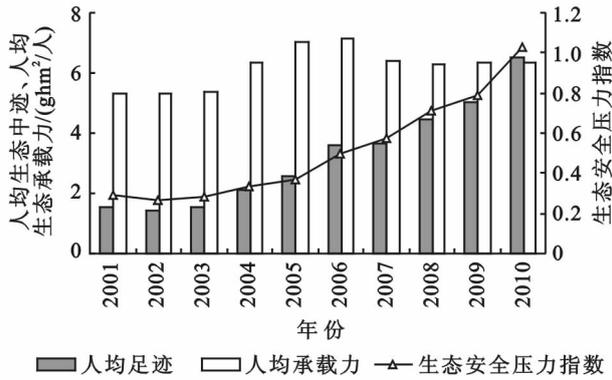


图 2 2001—2010 年人均足迹、人均承载力和生态安全压力指数变化

2001—2010 年生态足迹增加迅猛,生态承载力增加缓慢,导致生态安全压力指数增长趋势明显,增长了近 3.5 倍,基于生态压力指数的生态安全指标等级划分(表 1),2001—2005 年生态安全指数为 0.29~0.37,属于生态安全理想状态,2006—2009 年生态安全指数为 0.50~0.79,属于生态安全状态,2010 年生态安全指数达到 1.03,属于生态不安全状态,阿巴嘎地区未经过过渡期 2010 年从生态安全状态直接跨入到生态不安全状态。

3.2 生态安全影响因子分析

3.2.1 主成分分析结果

(1) 主成分载荷矩阵。由表 3 得出,第一主成分的特征根为 6.02,能够解释总变异的 75.26%,即第一主成分包含了原始信息的 75.26%,第二主成分的特征值为 1.30,解释了总变异的 16.22%,主成分的累计方差贡献率超过了 90%,说明前两个主成分已经能够反映 7 个指标因素 90% 以上的信息。根据确定主成分的一般原则:特征值 ≥ 1 或累计方差贡献率 $\geq 85\%$,可以确定分析生态安全影响的主成分数量为 2,提取前 2 个主成分。另外,提取的主成分原则上要求各指标因素的公因子方差(主成分载荷值的平方和)尽可能接近,如果某一指标因素的公因子方差与其他相比数值过小,则说明这一评价指标因素在提取的主成分中信息损失较大,应考虑增加主成分数目,从表 4 公因子方差可看出主成分取前两个即可。

主成分载荷是主成分与原始指标之间的相关系数,该数值(绝对值)越大则该主成分代表对应原始指标的能力越强。由表 3 和表 4 分析得到各主成分与原始指标之间的相互关系:第一主成分的方差贡献率高达 75.26%,集中了人均 GDP、工业产值占生产总值比重、单位面积固定资产投资、万人在校生数和

草场载畜量和人均化石能源消耗等指标因素的信息,这体现了总体经济水平、人民生活 and 人口素质、对草原开发利用程度等对草原生态安全影响的高度共线性可归结为社会经济类影响因子;而第二主成分仅与城市化率和降雨量相关,可归结为人居环境类影响因子,其它各载荷绝对值都未超过 0.5。

表 3 影响因子总方差

序号	因子名称	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	人均 GDP	6.02	75.26	75.26
2	工业产值占生产总值比重	1.30	16.22	91.48
3	单位面积固定资产投资	0.49	6.12	97.60
4	城市化率	0.12	1.53	99.12
5	万人在校生数	0.05	0.65	99.77
6	草场载畜量	0.01	0.12	99.89
7	降雨量	0.01	0.08	99.97
8	人均化石能源消耗	0.01	0.03	100

表 4 主成分载荷矩阵

项目	Z_1	Z_2	公因子方差
X_1	0.9821	0.1623	0.9908
X_2	0.9870	-0.1125	0.9868
X_3	0.9859	0.0772	0.9779
X_4	0.5112	0.7193	0.7787
X_5	-0.8822	0.3682	0.9138
X_6	-0.9547	0.1892	0.9472
X_7	-0.6153	-0.6231	0.7668
X_8	0.8834	-0.4189	0.9559

由特征向量,得到第一、第二主成分表达式:

$$Z_1 = 0.4003X_1' + 0.4022X_2' + 0.4018X_3' + 0.2083X_4' - 0.3595X_5' - 0.3891X_6' - 0.2507X_7' + 0.3600X_8'$$

$$Z_2 = 0.1425X_1' - 0.0988X_2' + 0.0677X_3' + 0.6315X_4' + 0.3232X_5' + 0.1661X_6' - 0.5470X_7' - 0.3677X_8'$$

其中 X_i' 表示原始指标数值经标准化后的数值。

主成分分析方法提取出 7 个指标因素的大部分信息,降维至 2 个主成分因素,它们是一组互不相关并能够充分代表原始指标的新变量。以此 2 个主成分因素作为自变量,进行多元线性回归分析,较好地消除了原始指标多重共线性问题的同时保持了原始变量的大部分信息。

(2) 回归分析。以两个主成分在 2001—2010 年的得分为自变量,生态压力指数为因变量,得到模型如下:

$$Y = 0.5135 + 0.1045Z_1 - 0.0193Z_2$$

最终确立回归模型。 $R^2 = 0.9816$, $R = 0.9793$,这说明建立的回归模型总体拟合很好,通过 F 检验和 t 检验, $p = 3.1387E-008 < 0.05$,回归模型成立。

3.2.2 影响因子分析

(1) 社会经济类影响因子。人均 GDP 与生态压力指数呈正相关,即人均 GDP 越高,施加的生态压力越大,阿巴嘎旗 2001 年人均 GDP 从 0.8 万元/人增长到 2010 年的 7.62 万元/人,人均 GDP 翻了三翻之多,说明生活水平增高显著,增加了对资源环境的需求,消费的同时也增加了对生态环境的压力。工业产值占生产总产值比重与生态压力指数呈正相关,2001—2010 年从 13.26% 增长到 73.19%,经济结构变化显著,工业是经济社会发展各产业中消耗能源和资源最大的产业,工业产值越高,对资源能源占用和消耗越多,生态环境压力增大。单位面积固定资产投资与生态压力指数呈正相关,单位面积固定资产投资 2001—2010 年从 0.20 万元/km² 增长到 18.22 万元/km²,单位固定资产投资成倍增长,资源耗用加大。万人在校生数与生态压力指数呈负相关,万人在校人数越高,人口整体素质将越高,生态环境保护意识将增强,施加给生态环境压力将适当降低。草场载畜量与生态压力指数呈负相关,说明载畜量越低,生态安全压力指数越高,2001—2010 年阿巴嘎旗载畜量从 2001 年的 75.56 只/km² 减少到 57.02 只/km²,主要是因为阿巴嘎旗通过组织实施京津风沙源治理、生态移民、舍饲禁牧等措施,草场单位面积畜牧头数减少,说明在 2001—2010 年阿巴嘎旗的载畜量在合理的草原承载范围内,草场载畜量稍大反而对生态安全有利。人均化石能源消耗与生态安全压力指数呈正相关,说明人均化石能源消耗越高生态安全压力指数越高,2001—2010 年阿巴嘎旗人均化石能源消耗从 0.66 吨标煤/人增加到了 6.72 吨标煤/人,增长了 10 倍,随着典型草原区煤炭资源的开采以及经济发展对能源消耗需求的增长,将对草原生态安全施加更大的压力。

(2) 人居环境类影响因子。降雨量与生态安全压力指数呈负相关,降雨量越高,生态安全压力将越小,因为阿巴嘎旗处于干旱地区,降雨量对植被的生长起到关键作用,因此若降雨量大,植被盖度增高,将提高生物性生产面积,进而提高当地的生态承载力,有利于当地的生态安全维护,但近年来降雨量降低趋势明显,2001 年降雨量 139.10 mm,2010 年降雨量仅为 52.00 mm。

城市化率与生态安全压力指数呈现正相关,城市化率越高,生态安全压力指数越高,阿巴嘎旗 2001—2010 年城市化率从 44.32% 增长到 60.14%,随着城镇化水平的提高,城镇消费结构的改变,城市化率越高,消费水平越高。

4 结论

依据本论文提出的生态安全评估方法,阿巴嘎旗生态安全压力指数增长趋势明显,增长了近 3.5 倍,从 2001 年的生态安全理想状态跨入到 2010 年的生态不安全状态,若要降低生态压力来提高生态安全等级,只有通过降低生态足迹,或提高生态承载力。由于阿巴嘎草原区土地利用类型以草地为主,2001—2010 年面积基本保持不变,约占总面积的 92%,由城市的扩张带来建设用地面积增加,对整体承载力影响较小,只有降低生态足迹才是最有效的措施,根据主成分分析的结果,应放缓经济发展速度,生产中资源配置起决定性作用,因此,未来典型草原区生态保护关注的重点之一应该是如何实现资源的有效配置,降低开发对生态安全构成的威胁,实现资源的永续利用。

本论文计算的生态足迹消费项目是按照典型草原区城镇人口消费和农牧民人口消费两项之和计算得到,主要反映的是生态足迹消费角度的生态安全。从阿巴嘎旗统计年鉴数据获悉,阿巴嘎旗农畜等产品的生产力量大于当地居民的消费量,作为主要能源的煤炭,其生产量大于当地的煤炭的消耗量,说明阿巴嘎旗属于能源资源输出区,部分资源能源的消费所生产的产品应已输出到其他地区,因此这部分产生的生态足迹应从当地减去,部分导致生态安全压力也应由资源能源输入地来承担,因此,加强生态足迹输入区与输出区之间的研究,使生态安全测算更加科学化,是我们下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [2] 叶笃正. 中国的全球变化与可持续发展研究[J]. 地球科学进展,1999,14(4):317-318.
- [3] 杨春红,张正栋,田楠楠,等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2012,19(3):209-214.
- [4] 黄海,刘长城,陈春. 基于生态足迹的土地生态安全评价研究[J]. 水土保持研究,2013,20(1):193-201.
- [5] 兰叶霞. 基于生态足迹的江西省生态安全时空动态定量研究[D]. 西安:陕西师范大学,2006.
- [6] Collins, A, Flynn A, Wiedmann T, et al. The environmental impacts of consumption at a subnational level: the ecological footprint of Cardiff[J]. Ind. Ecol., 2006, 10(3):9-24.
- [7] Wackernagel M, Kitzes J, Moran D, et al. The ecological footprint of cities and regions: comparing resource availability with resource demand [J]. Environ. Urban., 2006,18(1):103-112.

果可为河川乡土地利用的规划与管理提供数据基础与理论依据。例如,评价结果显示宜农地(高度宜农地和中度宜农地之和)所占比例为 20.83%,这与 2008 年河川乡耕地的实际比例 27.27% 进行比较,可以得出,河川乡土地不合理利用情况仍然存在,退耕还林(草)等生态恢复工程还需进一步推进。同时,结合实时变化的遥感数据,可以实现及时有效地土地利用监督。

本研究采用栅格数据进行评价运算,在评价精度上明显优于以地块为评价单元的评价,但在指导土地利用的实践中操作性相对较差。以地块为研究对象得到的适宜性评价结果对土地利用的指导更具可操作性。然而,研究区梁、峁、塬等地貌类型复杂多样,进行土地类型分类制图是一项复杂工程。借助于 GIS 与遥感等现代技术开展黄土高原地貌单元的自动提取研究,对于土地利用的评价、规划与管理具有重要的理论与现实意义。

参考文献:

[1] 何英彬,姚艳敏,唐华俊,等. 基于尺度推绎方法的生态脆弱区耕作适宜性研究[J]. 中国农学通报,2011,27(1): 263-269.

[2] 关小克,张凤荣,李乐,等. 北京市耕地后备资源开发适宜性评价[J]. 农业工程学报,2010,26(12):304-310.

[3] Fu B J, Wang Y F, Lu Y H, et al. The effects of land-use combinations on soil erosion: a case study in the Lo-

ess Plateau of China[J]. Progress in Physical Geography, 2009, 33(6): 793-804.

- [4] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 420-427.
- [5] 思祖,李凯荣,易亮,等. 黄土高原沟壑区杏树林地土壤水分时空动态变化及适宜性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 21-25.
- [6] 姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等. 甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6242-6248.
- [7] 张友焱,周泽福,程金花. 黄土丘陵沟壑区土地适宜性评价研究:以山西省中阳县圪针耳流域为例[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 93-95.
- [8] 魏宏安,王介勇. 延安市黄土丘陵沟壑区沟道土地整治适宜性评价研究[J]. 地域研究与开发, 2013, 32(3): 129-132.
- [9] 刘德林,郝仕龙,李壁成. 黄土高原上黄试区土地利用适宜性评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 252-254.
- [10] 全斌. 黄土高原六盘山区土地利用变化及生态农业模式比较研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2007.
- [11] 师维娟,杨勤科,赵东波,等. 中分辨率水文地貌关系正确 DEM 建立方法研究:以黄土丘陵区为例[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(2): 143-148.
- [12] Fang X, Xue Z J, Li B C, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2012, 88(1): 6-13.

(上接第 173 页)

[8] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961—1999: comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach[J]. Land Use Policy, 2004, 21(3): 261-269.

[9] Borucke M, Moore D, Cranston G, et al. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework[J]. Ecol. Indic., 2013, 24: 518-533.

[10] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [R]. Cambridge, UK., 2001.

[11] 任贤,张磊,王洋,等. 基于生态足迹理论的银川市生态安全评价[J]. 广东农业科学, 2010(6): 207-210.

[12] 李中才,徐俊艳,姬宇. 基于改进生态足迹的区域生态

安全评价研究:以山东省长岛县为例[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(3): 268-272.

- [13] 俞立平,潘云涛,武夷山. 学术期刊综合评价数据标准化方法研究[J]. 图书情报工作, 2009, 53(53): 136-139.
- [14] Wackemagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [15] 徐中民,张志强,程国栋,等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析[J]. 应用生态学报[J], 2003, 14(2): 280-285.
- [16] IPCC. Climate Change 2007: the Fourth Assessment Report (AR4) of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (R). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [17] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint[J]. Environ. Dev. Sustain., 2008, 10(4): 441-469.